病蟲害智慧監測技術與發展

林達德
國立臺灣大學生物機電工程學系

摘要

隨著全球人口增長，糧食需求持續攀升，農業面臨重大的挑戰。病蟲害是威脅糧食供應的重大因素之一，傳統的病蟲害管理方法依賴大量化學農藥，導致環境污染、生態失衡和抗藥性增加。智慧農業技術的發展，包括物聯網 (IoT)、人工智慧 (AI) 和大數據分析，為病蟲害監測提供了革新方案。智慧病蟲害監測系統運用影像處理和深度學習，實現對病蟲害的精準辨識與即時預警。此技術應用於溫室栽培環境時，可以監控微氣候條件 (如溫度、相對濕度等)，減少病蟲害風險，提高作物生長環境的穩定性。智慧預警系統基於監測數據與歷史資料判斷是否採取防治措施，減少過度農藥使用，保障環境安全。邊緣計算技術在無需穩定網路的情況下於應用端處理數據，適合偏遠地區或大規模農場應用，提升系統即時性和持續性。智慧型病蟲害管理系統結合即時性、精準性、廣域性、預測性、行動裝置和集合智慧等特性，使農場管理更數據驅動化。未來，這些技術將與自主學習、系統優化結合，朝高度自動化、可持續的智慧病蟲害管理模式發展，使農業管理更加精準、環境友善，並推動全球農業邁向智慧化與永續發展。

關鍵詞：病蟲害監測、智慧農業、深度學習、影像處理

一、前言

隨著全球人口持續增長和糧食需求的急速提升，農業生產面臨著許多壓力和挑戰。根據聯合國的預測，到 2050 年，全球人口將達到約 97 億，這將進一步推高對糧食的需求。糧食供應的穩定性和安全性不僅依賴於有效的栽培技術，還受到外部環境變數和自然災害的威脅。除了氣候變遷對作物生長環境的深遠影響，病蟲害已成為威脅全球糧食安全的關鍵因素之一。病蟲害不僅直接減少了農作物的產量，還可能破壞農業生態系統的平衡，導致更嚴重的生態後果。根據聯合國糧食及農業組織 (FAO) 的統計，全球每年約有高達 20% 至 40% 的農作物因病蟲害而遭受不同程度的損失，這對全球的糧食供應鏈和農業經濟造成了巨大的衝擊 (FAO, 2022; Oerke, 2006; Savary et al., 2019)。

傳統的病蟲害管理策略主要依賴於化學農藥的大量使用，這不僅增加了農業生產成本，還對環境健康構成了嚴重威脅。農藥的過度使用會導致害蟲的抗藥性增強，進一步削弱防治效果，還會污染土壤和水源，損害生物多樣性，並危害人類健康。此外，傳統的人工監測方法如使用黏蟲紙或實地視覺檢查，不僅費時費力，而且效率低，無法快速獲得量化的資訊，難以滿足大規模農業生產的需求。

為了應對這些挑戰，農業科技的快速發展為病蟲害監測和管理提供了嶄新的技術路徑。隨著物聯網 (IoT)、人工智慧 (AI) 和大數據技術的崛起，智慧農業得以大幅度提升

病蟲害監控的精準性和自動化程度。IoT 技術可以實現對農田環境的全天候遠程監控，AI 技術則可以對捕捉到的害蟲影像進行即時識別和分類，大數據分析能夠幫助農民預測病蟲害的發生趨勢，從而更好地進行防治決策 (Popescu et al., 2023)。

智慧害蟲監測系統通過整合這些先進技術，不僅減少了勞力的需求，還顯著提高了監測的精度和效率。這些系統能夠即時提供農田的病蟲害情況，並根據實時數據進行風險評估與預警，使農業生產朝著更加智慧化、精準化和可持續的方向發展 (Rustia et al., 2022)。本文將進一步探討病蟲害智慧監測技術的現狀及未來發展，涵蓋害蟲智慧偵測與辨識系統、溫室作物栽培環境監測與分析、病蟲害預警系統以及智慧型病蟲害整合管理的未來願景。

二、害蟲智慧偵測與辨識系統

智慧害蟲偵測與辨識系統結合了物聯網和影像處理技術，為作物整合性病蟲害管理提供了自動化和精準化的創新方案。傳統的方法如人工檢查黏蟲紙或誘捕陷阱雖然在某些情況下有效，但通常需要耗費大量時間和人力，而且容易受到人為誤差影響。透過自動化的監測與分析，農民能即時掌握田間狀況，採取適當的防治措施。

我們研究團隊所研發的系統，其核心技術在於自動化的害蟲偵測與辨識以及作物栽培環境的即時監測與數據分析。傳統上，農民對於作物栽培環境的病害與蟲害狀況多憑巡田觀察與經驗，或是需定期檢查黏蟲紙上的害蟲數量與種類獲得粗略的訊息，過程耗時費力且無法精準判斷。智慧監測系統透過樹莓派嵌入式系統上高解析度攝影機定期拍攝黏蟲紙影像，並利用深度學習演算法進行分析，運用深度學習 AI 影像辨識技術，對黏蟲紙上的害蟲進行偵測與辨識。透過大量已標註的害蟲影像進行訓練，模型能學習並識別不同種類的害蟲。目前可以辨識八種常見的微型害蟲，平均辨識率 F1-score 達 90% 以上。

如圖 1 所示，在設計架構上，系統由多個感測節點組成，每個節點包含攝影機模組、環境感測器 (如溫度、濕度、光照等) 和無線傳輸模組。這些節點分布於溫室或田間各處，定期收集影像與環境數據，並透過無線網路將資料傳送至中央伺服器。伺服器對數據進行處理與分析，並將結果呈現在用戶端的網頁或行動裝置上，供農民即時查看。系統設計著重幾個原則以利系統的研發與應用推廣的未來性，包括：採用取得容易的嵌入式系統與元件，模組化設計以利組裝與安裝的簡易性，防塵與防水設計以適用於較於複雜與惡劣的作物栽培環境，整體價格必須低廉以利推廣於農民應用 (Rustia et al., 2020)。

物聯網通訊方式在系統中扮演關鍵角色。感測節點透過無線通訊將數據傳輸至閘道器，再由閘道器將資料上傳至雲端伺服器。這種架構確保了數據傳輸的穩定性與即時性，並降低了佈建成本。智慧害蟲與環境監測系統的特色在於其即時性、自動化與精準度。透過自動化的數據收集與分析，農民能即時掌握田間的病蟲害狀況，減少對人工監測的依賴。此外，系統能提供長期的數據累積，協助農民分析病蟲害的發生趨勢，制定更有效的防治策略，或是進行栽培環境的改善。在病蟲害整合管理方面，該系統透過即時監測與預警，農民能在病蟲害爆發初期即採取措施，降低損失。此外，系統提供的數據能協助農民優化農藥使用，減少過度施藥，降低環境污染。此系統經由構想、設計、製作、

不斷的測試改良、技轉、商品化設計商品化驗證與測試、推廣應用等階段，終能由實驗室的上游研發落實至實際的農業場域落地應用。

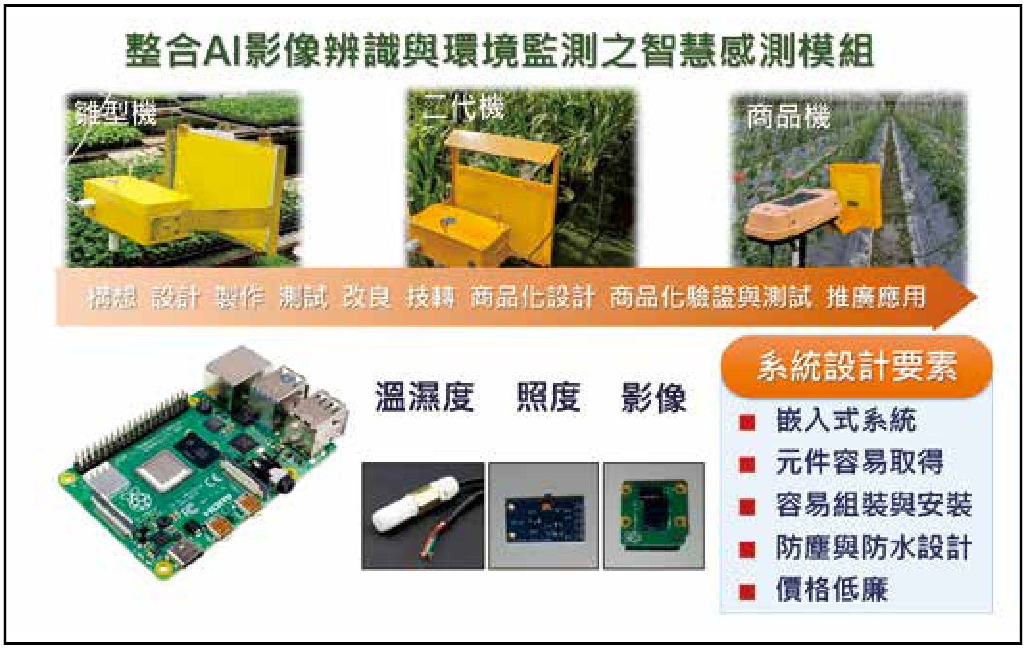

圖 1. 整合 AI 影像辨識與環境監測之智慧感測模組設計架構與系統設計要素

整體而言，智慧害蟲與環境監測系統透過先進技術的整合，提升了農業病蟲害管理的效率與精準度。這些技術不僅減少了農民勞力與時間，也提高了防治效率與精準度。透過整合 AI、物聯網及大數據技術，智慧害蟲監測系統為病蟲害整合管理提供了新的模式，有助於更好理解作物與環境之間相互作用，逐步實現基於數據進行栽培管理的新契機。

三、溫室作物栽培環境監測與分析

溫室栽培作為現代農業中的關鍵技術，能夠為作物創造相對穩定且可控的生長環境。通過精確控制關鍵環境因素，如溫度、濕度、光照及二氧化碳濃度等，可以有效優化作物生長條件，提高產量與質量。然而，這些環境因素同樣對病蟲害的發生有顯著影響，因此精準的環境監測與即時的數據分析至關重要。研究顯示，環境變數的微小變化可能會引發病蟲害的爆發，因此建立有效的監測系統是必要的，對於病蟲害的發生與蔓延可以及早因應並提出有效的防治措施 (Wang, 2024)。

現代智慧農業技術使得對溫室環境的實時監控變得更加自動化與精確。根據 Soheli 等人 (2022) 的研究，溫室系統利用物聯網 (IoT) 和模糊推理系統來自動化控制氣候條件，通過感測器實時收集溫度、濕度、陽光和土壤濕度等數據，並將這些數據作為輸入變量進行處理。這些感測器通常連接至 IoT 平台，通過雲端實時傳輸與分析數據，以便

為管理者提供分析報告。當某些參數達到有利於害蟲繁殖或病害爆發的臨界值時，系統可以自動發送警報提醒管理者進行調整，以減少風險。

我們研究團隊所研發基於物聯網的智慧監測系統，除了害蟲的辨識以外，由於監測模組安裝有溫濕度感測器與光照感測器，亦可以對於栽培環境的微氣候進行長時間與即時的監測。符合前述的概念，對於作物的栽培管理可以經由數據分析與模型建立等方法將數據轉為有用的作物栽培管理資訊。如圖 2 所示，運用物聯網監測系統收集並分析溫室內的害蟲、栽培介質、微環境等資訊，對作物栽培具有多方面的優勢。透過即時監測溫室內的溫度、濕度、光照等微氣候參數，確保環境條件適宜作物生長。此外，監測模組亦可以透過藍芽等通訊協定連接外加的土壤與介質感測器，可進一步監測土壤或水耕介質的 pH 值、電導度 (EC 值) 等，確保養分供應適當，避免過度施肥或缺乏養分，促進作物健康生長。收集的數據經過分析，可建立作物生長模型，預測生長趨勢，優化管理決策。綜上所述，IoT 監測系統在溫室作物栽培中，透過即時監測與精準分析，提供全面的環境與作物資訊，協助農民優化管理策略，提升作物品質與產量，實現智慧農業的目標。

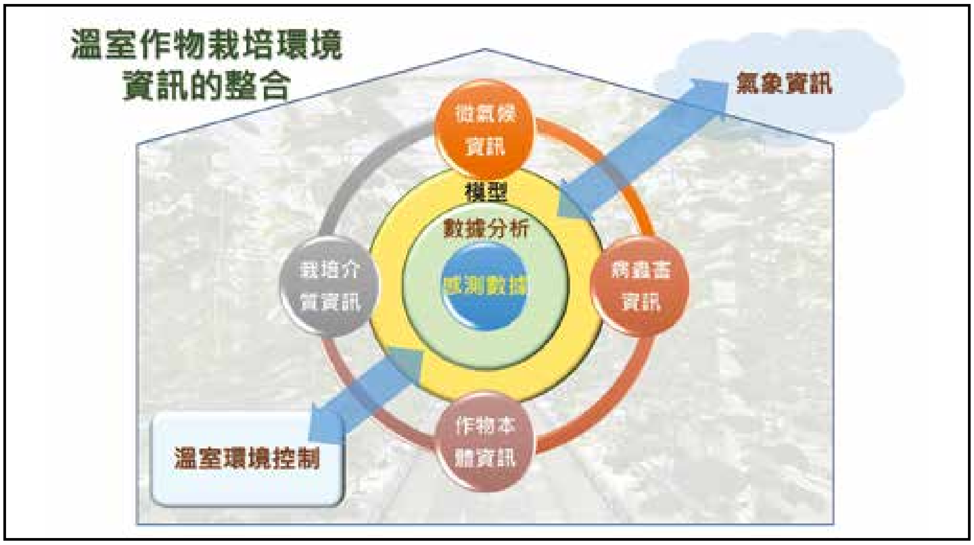

圖 2. 運用智慧監測系統達成溫室作物栽培環境資訊的整合

四、病蟲害預警與管理

病蟲害預警系統在現代農業中扮演著至關重要角色，它們能幫助農民及時掌握病蟲害發展趨勢，以採取有效防控措施最大程度減少作物損失。預警系統核心是能夠預測病蟲害爆發時間與強度，不僅幫助降低生產風險，也能減少農藥過度使用，以實現可持續管理。

現代病蟲害預警系統通常結合先進感測器、物聯網、AI 及大數據技術，自動收集大量環境數據，如溫度、濕度、光照強度等因素直接影響病蟲害發生。例如，在適合溫度與高濕條件下，有利於某作物病害發生的風險，使得環境監控成為預警中的關鍵要素 (He et al., 2023)。

此外，預警系統通常基於經濟門檻模型來決定是否需要進行防治。經濟門檻指的是病蟲害密度達到使作物損失經濟成本超過防治成本臨界值。一旦超過該門檻，系統會自動建議採取控制措施，如使用化學防治、生物防治或物理防護等措施，以合理配置資源並避免不必要使用農藥。害蟲監測系統的優勢為即時監測與得以紀錄長期歷史資訊，透過數據分析與機器學習模型，我們所研發的系統可以依據每日特定害蟲的增加數量來建立預警燈號，透過簡訊或手機 APP 即時提醒農民進行不同程度的管理作為。

圖 3 所示為智慧害蟲偵測與辨識系統所提供給農民的資訊。監測模組持續監測栽培場域的溫度、濕度、照度等環境參數，整合區域氣象資料，計算累積溫度和光照等指標，了解環境變化對作物生長和病蟲害發生的影響。進一步透過數據分析與模型建立提供即時預警。

針對特定作物，系統評估病害發生的環境風險指標，提供相應的防治資訊，協助農民制定有效的病害管理方案。此外，系統記錄施藥歷史，自動偵測施藥行為，提供溫室影像即時監測功能，設置施藥備忘錄，提醒農民按時進行防治作業，確保防治效果，減少農藥使用量。此外，系統可生成詳細報表，分析微氣候變化與害蟲發生的關聯，提供長期趨勢分析，協助農民了解病蟲害發生規律，制定長期管理策略。整合各項資訊，系統提供智慧化的作物栽培建議。

圖 3. 病蟲害監測與預警系統的管理資訊

透過溫室物聯網監測系統收集的溫度和濕度數據，農民可以有效預測作物病害的發生風險。持續監測這些環境參數，有助於及早發現可能引發病害的微氣候變化。利用先進的建模技術，分析收集到的數據，能根據環境條件預測病害風險。研究顯示，將溫度和濕度數據與病害發生的觀察結果結合，可提高病害嚴重程度預測的準確性。例如 Newlands (2018) 的研究中運用 CLR 模型透過設定病原菌的最低、最高和最適發芽與感

染溫度，以及關鍵的葉片濕潤持續時間，來預測作物病害風險，強調高相對濕度對病害發生的重要性。此外，自動化系統可依據病害風險的評估來即時調整環境條件，降低不利溫度和濕度水平帶來的風險，這不僅可降低作物受到病害的影響，還減少對人工監測的依賴。

對於作物病害的發病風險，我們建立了一個簡易的數學模型，運用作物病害的發病溫度範圍與最適溫度，於高相對濕度的條件下，可以評估栽培環境微氣候的病害好發環境風險。進而運用所計算的風險指數來提供農民淺顯易懂的風險燈號，以利及時進行降低風險的環境控制。圖 4 所示是以番茄種苗的細菌性斑點病好發環境風險預警為例，顯示一家育苗場栽培環境的長期監測結果。由上圖中可見番茄種苗的細菌性斑點病好發環境風險的週期性，在夏季較高溫高濕的條件下，風險相對於冬季為高。下圖中亮紅色燈號的時間則代表高病害環境風險，應特別注意溫室的通風以降低環境的相對濕度，以減少發病的機率。透過歷史資料的觀察與分析，溫室管理者亦可據以改善栽培環境的環境控制條件，例如調整溫室通風的時間與頻率、安裝循環風扇以減少溫室內相對濕度偏高的位置等措施。

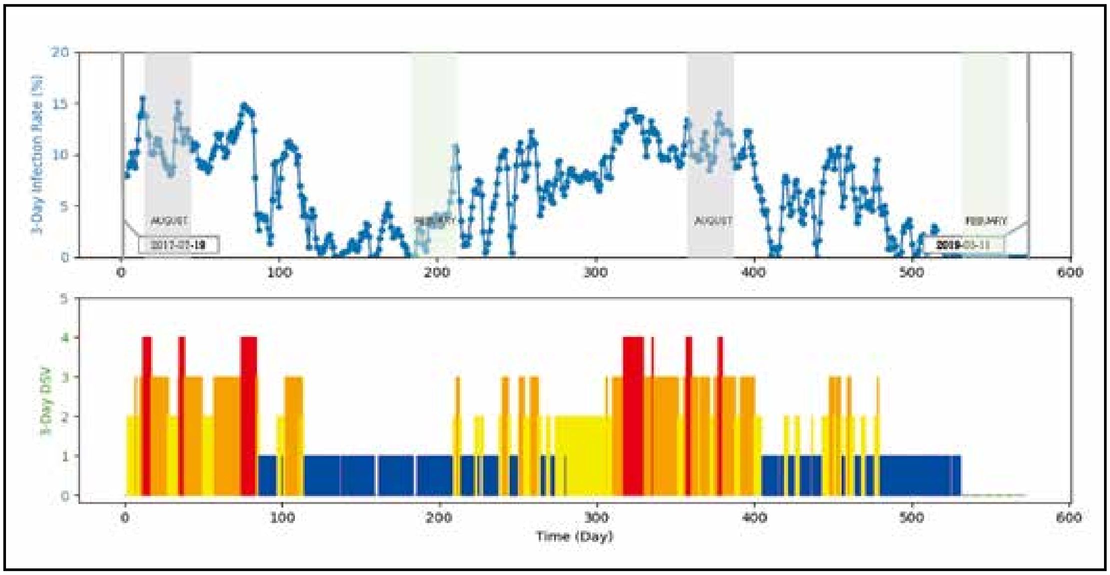

圖 4. 育苗場長期監測與番茄種苗細菌性斑點病好發風險指數分析

五、智慧型病蟲害整合管理之未來願景

隨著人工智慧和物聯網的迅速發展，智慧型病蟲害整合管理正為農業帶來嶄新轉變。傳統病蟲害綜合管理包含監測、預防、干預和評估四個步驟，而新的智慧模式則透過自動化技術和精準分析提升管理效率，結合即時性、精準性、廣域性、預測性等特性，使農場管理更有效率。

透過自動化監測和異常檢測，系統提供即時可靠的數據來源，讓管理者迅速回應異常情況，如害蟲爆發或病害風險。系統會即時通知管理者，並提供因地制宜的行動建議，包含行動裝置上的推薦選項，推動更環保的防治方法，例如天然農藥或混合防治方案，

實務上展現良好效果。智慧型病蟲害整合管理還支援選擇性干預，使管理者能聚焦於特定區域，例如透過空間數據檢視害蟲入侵點，並根據環境感測數據調整通風設備，以降低病害風險。

此系統的特點之一是能結合巨量資料與數據分析，透過量化數據讓管理者評估行動有效性，提升農場管理的經濟效益。未來，智慧型病蟲害整合管理系統將朝向高度智慧化，結合自主學習和系統優化技術，不斷從即時數據中提高預測與決策的精準度。隨著系統持續運行，AI 模型逐漸掌握害蟲行為特徵，能提供更精準的預警與防治建議，逐步減少對外部專家的依賴。這種全自動化、精準化、可持續的發展模式，將成為未來整合性病蟲害管理的必然趨勢 (Rustia et al., 2022)。

參考文獻

1. FAO. 2022. FAO's Plant Production and Protection Division. Rome. https://doi.org/10.4060/cc2447en.
2. He, J., Chen, K., Pan, X., Zhai, J., & Lin, X. (2023). Advanced biosensing technologies for monitoring of agriculture pests and diseases: A review. Journal of Semiconductors, 44(2), 023104.
3. Newlands, N. K. (2018). Model-based forecasting of agricultural crop disease risk at the regional scale, integrating airborne inoculum, environmental, and satellite-based monitoring data. Frontiers in Environmental Science, 6, 63.
4. Oerke, E. C. (2006). Crop losses to pests. The Journal of agricultural science, 144(1), 31-43.
5. Popescu, R., Pope, A., Lee, K. S., Alberts, S., Chiang, Y. K., Lee, S., ... & Ramakrishnan, V. (2023). Tracing the Total Stellar Mass and Star Formation of High-redshift Protoclusters. The Astrophysical Journal, 958(1), 12.
6. Rustia, D. J. A., Lin, C. E., Chung, J. Y., Zhuang, Y. J., Hsu, J. C., & Lin, T. T. (2020). Application of an image and environmental sensor network for automated greenhouse insect pest monitoring. Journal of Asia-Pacific Entomology, 23(1), 17-28.
7. Rustia, D. J. A., Chiu, L. Y., Lu, C. Y., Wu, Y. F., Chen, S. K., Chung, J. Y., ... & Lin, T. T. (2022). Towards intelligent and integrated pest management through an AIoT-based monitoring system. Pest Management Science, 78(10), 4288-4302.
8. Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S. J., Esker, P., McRoberts, N., & Nelson, A. (2019). The global burden of pathogens and pests on major food crops. Nature ecology & evolution, 3(3), 430-439.
9. Wang, C. (2024). Intelligent agricultural greenhouse control system based on internet of things and machine learning. arXiv preprint arXiv:2402.09488.

The Technology and Development of Intelligent Pest and Disease Monitoring

Ta-Te Lin

Department of Biomechatroincs Engineering, National Taiwan University

ABSTRACT

With the growing global population and increasing food demands, agriculture faces unprecedented challenges. Pest and disease threats have become major factors endangering food security. Traditional pest management methods rely heavily on chemical pesticides, leading to environmental pollution, ecological imbalance, and increased pest resistance. The advancement of smart agricultural technologies, including the Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), and big data analytics, has introduced innovative approaches to pest monitoring. Smart pest monitoring systems use image processing and deep learning to achieve precise identification and real-time alerts for pest incidents. When applied to greenhouse environments, these systems monitor microclimate conditions (e.g., temperature, humidity), reducing pest risks and enhancing crop growth stability. Smart warning systems, leveraging historical data and model analysis, enable the determination of effective, eco-friendly control measures, reducing pesticide overuse and enhancing environmental safety. Edge computing enables local data processing without reliance on stable internet connections, suitable for remote or large-scale farms, enhancing system immediacy and continuity. Future intelligent pest management systems incorporate real-time, precision, wide-range, predictive, mobile, and collective intelligence features, making farm management more data-driven. These technologies, combined with autonomous learning and system optimization, will advance towards highly automated and sustainable pest management, promoting precise, eco-friendly agricultural management and driving global agriculture towards smart and sustainable development.

Keywords: Pest and disease monitoring, smart agriculture, deep learning, image processing